

“TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO DA  
DIFERENÇA DE FREQUÊNCIA ÓPTICA ENTRE A RADIAÇÃO DE DUAS  
OU MAIS FONTES LASER UTILIZANDO O ESPALHAMENTO  
BRILLOUIN ESTIMULADO”

5 A presente patente tem por objetivo apresentar  
uma técnica que se destina a estabilizar a diferença de frequência entre os  
campos ópticos produzidos por duas ou mais fontes de radiação laser, utilizando  
para este fim o efeito óptico não linear conhecido como espalhamento Brillouin  
estimulado ocorrendo em fibras ópticas. A técnica apresentada possui aplicações  
10 em sensores distribuídos em fibra óptica utilizando o efeito Brillouin estimulado  
e em sistemas de comunicação óptica DWDM (Dense Wavelength Division  
Multiplexing – multiplexação densa por comprimento de onda)

A estabilização da diferença entre a frequência  
de dois campos ópticos pode ser feita atualmente com o uso de espectrômetros  
15 ópticos, interferometria óptica, técnicas heteródinas e indiretamente com o  
auxílio de dispositivos em fibra óptica conhecidos como grades de Bragg.

Quando existe a necessidade de estabilizar a  
diferença de frequência entre dois campos ópticos em valores menores que  
100GHz, diversas dificuldades aparecem. Primeiramente espectrômetros ópticos  
20 possuem limitada resolução espectral, em torno de 1GHz. Segundo, não  
obstante as resoluções espectrais teóricas associadas aos interferômetros ópticos,  
os mesmos necessitam de demasiados cuidados práticos para obterem a sua  
máxima performance, tornando-os pouco aconselháveis para aplicações em  
ambientes de condições adversas. Técnicas heteródinas estão associadas a  
25 equipamentos com alto custo agregado, como detectores ópticos de alta  
frequência e analisadores de espectro de microondas, onerando em demasia o  
sistema de controle.

A técnica proposta aqui visa minimizar os  
inconvenientes acarretados pelas técnicas citadas acima, através do uso do efeito  
30 Brillouin estimulado ocorrendo em fibras ópticas. A técnica proposta consiste  
em utilizar a dependência espectral dos fenômenos conhecidos como

amplificação Brillouin e atenuação Brillouin na implementação de um controle da diferença de frequência entre as radiações de dois lasers que interagem continuamente em uma fibra óptica através do efeito Brillouin.

Esta técnica, concebida inicialmente para a  
5 estabilização da diferença de frequências entre duas fontes de radiação laser, pode ser estendida, através de uma configuração óptica própria para a estabilização do intervalo de frequência entre mais de duas fontes de radiação laser. Tal sistema permite reduzir de maneira segura o espaçamento entre diversos canais ópticos para valores tão pequenos quanto 11GHz em sistemas de  
10 comunicação óptica com multiplexação de comprimento de onda operando na região de 1,5 $\mu$ m.

O espalhamento Brillouin estimulado é descrito classicamente como uma interação paramétrica entre dois campos ópticos, propagando em sentidos contrários, e um campo acústico hipersônico. Os  
15 campos ópticos são denominados respectivamente de campo de Bombeio e campo de Prova, observando que a frequência óptica do campo de Bombeio é maior que a do campo Prova. Em termos gerais, a principal característica do efeito Brillouin é a amplificação do campo de Prova, a qual ocorre concomitantemente com a atenuação do campo de Bombeio.

20 Tais fenômenos ocorrem em virtude da interação dos campos ópticos com o meio de propagação através da dependência das propriedades ópticas do meio de propagação com a intensidade e a frequência dos campos ópticos interagentes.

A figura 1 apresenta o esquema básico utilizado  
25 para se observar experimentalmente o espalhamento Brillouin estimulado em fibras ópticas. Duas fontes de laser, (101) e (102), são utilizadas para a inserção dos campos ópticos em um rolo de fibra óptica mono-modo, (109), com comprimento  $L$  através do uso de acopladores ópticos direcionais (103) e (104). A fonte de laser (101) permite o controle da sua frequência de emissão, isto é,  
30 trata-se de um laser capaz de ser sintonizado. As fontes de laser (101) e (102) produzem potências ópticas constantes no tempo. Quatro medidores de potência

óptica, (105), (106), (107) e (108) são utilizados para se monitorar a potência óptica emergindo pelas portas livres dos acopladores (103) e (104). O isolador óptico (110) impede a reverberação do campo óptico proveniente de (102) na cavidade da fonte de laser (101). O isolador óptico (111) impede a reverberação do campo óptico proveniente de (101) na cavidade da fonte de laser (102).

Por conveniência, vamos considerar a fonte de laser (101) como sendo a fonte do campo de Bombeio e a fonte de laser (102) como sendo a fonte do campo de Prova. Nesta situação a frequência de emissão da fonte de laser (101) é maior que a frequência de emissão da fonte de laser (102). Denominaremos a diferença de frequência óptica entre a radiação do laser (101) e do laser (102) como sendo  $\Delta f = f_{101} - f_{102}$ .

Em regime estacionário, isto é, (101) e (102) fornecendo potências ópticas constantes ao longo do tempo, teremos que a relação entre  $\Delta f$  e a potência medida em (105), referente à amplificação do campo de Prova pelo efeito Brillouin, será tal como apresentado na figura 2. Esta dependência possui, a mesma forma funcional de uma distribuição de Lorentz:

$$P_{105}(\Delta f) = P_{BASE1} + (P_{MAX} - P_{BASE1}) \frac{(W_B/2)^2}{[\Delta f - f_B]^2 + (W_B/2)^2}$$

na qual,  $P_{MAX}$  é a máxima potência óptica amplificada,  $W_B$  é a largura da região de amplificação,  $P_{BASE1}$  é a potência óptica atenuada do laser (102) pela absorção óptica no meio de interação:

$$P_{BASE1} = k_{104ab} k_{103bc} P_{102} e^{-\alpha L}$$

na qual  $k_{104ab}$  é a razão de acoplamento entre a porta (104a) e (104b),  $k_{103bc}$  é a razão de acoplamento entre a porta (103b) e (103c) e  $\alpha$  é o coeficiente de absorção óptica da fibra óptica (109). A posição de amplificação/atenuação máxima  $f_B$  é um parâmetro relativo ao efeito Brillouin, conhecido como desvio Brillouin em frequência e definido pela relação:

$$f_B = 2 \frac{v_A}{v_F} f_{BOMBEIO}$$

na qual,  $v_A$  é a velocidade do som no meio de interação,  $v_F$  é a velocidade da luz na fibra e  $f_{BOMBEIO}$  é a frequência do campo óptico de Bombeio. Para uma frequência óptica de bombeio igual à 227,27THz, equivalente à um comprimento de onda de bombeio igual à 1,3 $\mu$ m, o valor de  $f_B$  é igual à 13GHz.

- 5 A largura da região de ganho  $W_B$  é próxima de 60MHz para fibras ópticas monomodo utilizadas em sistemas de comunicação óptica.

Ao mesmo tempo que a potência do campo proveniente da fonte de laser (102) é amplificada pelo efeito Brillouin, a potência da fonte de laser (101) é atenuada pelo efeito Brillouin. A figura 3  
10 apresenta a relação entre  $\Delta f$  e a potência medida em (108), referente à atenuação do campo de Bombeio, a qual é descrita pela relação:

$$P_{108}(\Delta f) = P_{BASE2} - (P_{BASE2} - P_{MIN}) \frac{(W_B/2)^2}{[\Delta f - f_B]^2 + (W_B/2)^2}$$

na qual  $P_{MIN}$  é a potência mínima atenuada detectada por (108) e  $P_{BASE2}$  é a potência óptica atenuada do laser (101) pela absorção óptica no meio de  
15 interação:

$$P_{BASE2} = k_{103ad} k_{104ad} P_{101} e^{-\alpha L}$$

na qual  $k_{103ab}$  é a razão de acoplamento entre as portas (103a) e (103b),  $k_{104ad}$  é a razão de acoplamento entre as portas (104a) e (104d).

A sensibilidade, à meia altura ( $\Delta f = f_B \pm W_B/2$ ),  
20 da potência óptica amplificada/atenuada pelo efeito Brillouin com a diferença de frequência óptica entre os lasers (101) e (102) é dada pela relação:

$$\left. \frac{\partial P_{105/108}}{\partial \Delta f} \right|_{\Delta f = \pm \frac{W_B}{2}} = \mp \frac{k_{105/108}}{W_B}$$

na qual  $k_{105} = (P_{MAX} - P_{BASE1})$  e  $k_{108} = -(P_{BASE2} - P_{MIN})$ . Assim observa-se que esta sensibilidade depende das amplitudes efetivas de amplificação ou atenuação e da  
25 largura espectral da região de ganho Brillouin,  $W_B$ . Variações das potências ópticas  $P_{105}$  e  $P_{108}$  são decorrentes então de variações em  $\Delta f$ .

Pelas figuras 2 e 3, e pelas equações apresentadas, pode-se observar que mantendo a potência óptica

amplificada/atenuada constante, a diferença de frequência entre os lasers (101) e (102),  $\Delta f$ , também é mantida constante. A técnica apresentada aqui utiliza esta constatação simples para estabilizar  $\Delta f$  em um valor próximo à  $f_B$ .

Podemos ainda, utilizar conjuntamente as características de amplificação Brillouin e de atenuação Brillouin (figuras 2 e 3), para estabilizar  $\Delta f$ . Temos que a diferença entre as potências ópticas detectadas por (105) e (108) é tal que:

$$P_{105}(\Delta f) - P_{108}(\Delta f) = (P_{BASE1} - P_{BASE2}) + (P_{MAX} - P_{MIN} - P_{BASE1} + P_{BASE2}) \frac{(W_B/2)^2}{[\Delta f - f_B]^2 + (W_B/2)^2}$$

observa-se desta relação que, estabilizando a diferença  $P_{105} - P_{108}$  estaremos como consequência estabilizando  $\Delta f$ .

A figura 4 apresenta o diagrama de blocos para um primeiro sistema de estabilização que utiliza a característica de amplificação do campo de prova proveniente do laser (102) para estabilizar  $\Delta f$  atuando na frequência de emissão do laser (101). Os sinais  $S_{105}$  e  $S_{107}$  são proporcionais às potências ópticas  $P_{105}$  e  $P_{107}$ . A primeira operação deste sistema é obter um sinal proporcional apenas à parcela amplificada da radiação do laser (102) detectada em (105). Para esse fim, um bloco de ganho, (401), amplifica ou atenua o sinal detectado em (107),  $S_{107}$ , com um ganho  $G_{401}$  ajustável tal que:

$$G_{401} \propto \frac{P_{BASE1}}{P_{107}}$$

desta forma o sinal de diferença gerado pelo bloco de subtração (402),  $S_{402}$ , será devido apenas a parcela efetivamente amplificada pelo efeito Brillouin. O ganho  $G_{402}$  é aplicado para elevar a amplitude do sinal de diferença entre  $S_{105}$  e  $S_{401}$  facilitando o seu tratamento eletrônico. O filtro passa-baixa, (403), é utilizado para reduzir o ruído contido no sinal de diferença  $S_{402}$ . O sinal  $S_{403}$  é então comparado pelo bloco de subtração (404) com um sinal de referência gerado por (405),  $S_{405}$ , gerando o sinal de erro  $S_{404} = S_{403} - S_{405}$ .

O sinal de erro é então processado por um bloco controlador (406), por exemplo um controle analógico PID (Proporcional, Integral e Derivativo), o qual gera o sinal de controle,  $S_{406}$ , para a frequência de

emissão do laser (101). O sinal  $S_{406}$  visa compensar, através do controle de  $f_{101}$ , as variações em  $S_{403}$  em torno do ponto de referência  $S_{105}$ , devido às perturbações em  $\Delta f$ .

A figura 5 apresenta os sinais envolvidos no sistema de controle da figura 4 exemplificando a técnica de estabilização aqui proposta. A perturbação em  $\Delta f$ , causada pelo ruído na frequência de emissão dos lasers (101) e (102), acarreta uma modulação no valor do campo óptico amplificado detectado por (105). Variações na potência de inserção do campo do laser (102) causam variações da potência óptica detectado por (105) que podem ser confundidas com a perturbação externa em  $\Delta f$  que se deseja neutralizar. Assim, a potência de inserção do campo do laser (102) é monitorada pelo detector (107) e descontada através de (401) e (402) da potência óptica amplificada detectada em (105), gerando o sinal  $S_{403}$ , correspondente apenas à parcela efetivamente amplificada detectada em (105). O sinal  $S_{403}$  é comparado com sinal de referência  $S_{405}$  gerando o sinal de erro  $S_{404}$  que será utilizado pelo bloco de controle, (406), para prover um sinal de controle,  $S_{406}$ , que compensará a perturbação em  $\Delta f$  através da variação da frequência de emissão da fonte de laser (101). O sinal  $S_{406}$  visa compensar, através do controle de  $f_{101}$ , as variações de  $S_{403}$  em torno do ponto de referência  $S_{405}$ , devido às perturbações em  $\Delta f$ .

A mesma idéia utilizada no sistema de estabilização da figura 4 pode ser utilizada para estabilizarmos  $\Delta f$  utilizando a característica de atenuação do efeito Brillouin mostrada na figura 3. A figura 6 apresenta o diagrama de blocos para um segundo sistema de estabilização que utiliza a característica de atenuação Brillouin do campo de bombeio proveniente do laser (101) para estabilizar  $\Delta f$  atuando na frequência deste mesmo laser. Os sinais  $S_{108}$  e  $S_{106}$  são proporcionais às potências ópticas  $P_{108}$  e  $P_{106}$ . A primeira operação deste sistema é obter um sinal proporcional apenas à parcela atenuada da radiação do laser (101) detectada em (108). Para esse fim, um bloco de ganho, (601), amplifica ou atenua o sinal detectado em (106),  $S_{106}$ , com um ganho  $G_{601}$  ajustável tal que:

$$G_{601} \propto \frac{P_{BASE2}}{P_{106}}$$

desta forma o sinal de diferença gerado pelo bloco de subtração (602),  $S_{602}$ , será devido apenas a parcela efetivamente atenuada pelo efeito Brillouin. O ganho  $G_{602}$  é aplicado para elevar o nível do sinal de diferença entre  $S_{108}$  e  $S_{601}$  facilitando o seu tratamento eletrônico. O filtro passa-baixa, (603), é utilizado para reduzir o ruído contido no sinal de diferença  $S_{602}$ . O sinal  $S_{603}$  é então comparado pelo bloco de subtração (604) com um sinal de referência gerado por (605),  $S_{605}$ , gerando o sinal de erro  $S_{604}=S_{603}-S_{605}$ .

O sinal de erro é então processado por um bloco controlador (606), por exemplo um controle analógico PID (Proporcional, Integral e Derivativo), o qual gera o sinal que controla a frequência de emissão do laser (101). O sinal  $S_{606}$  visa compensar, através do controle de  $f_{101}$ , as variações em  $S_{603}$  em torno do ponto de referência  $S_{605}$ , devido às perturbações em  $\Delta f$ .

A figura 7 apresenta o diagrama em blocos para um terceiro sistema de estabilização que utiliza conjuntamente a amplificação Brillouin e a atenuação Brillouin para estabilizar  $\Delta f$  através do controle da frequência de emissão do laser (101). Os sinais  $S_{105}$ ,  $S_{107}$ ,  $S_{108}$  e  $S_{106}$  são proporcionais as potências ópticas  $P_{105}$ ,  $P_{107}$ ,  $P_{108}$  e  $P_{106}$ . O bloco de ganho, (701), amplifica ou atenua o sinal detectado em (107),  $S_{107}$ , com um ganho  $G_{701}$  ajustável tal que:

$$G_{701} \propto \frac{P_{BASE1}}{P_{107}}$$

desta forma o sinal de diferença gerado pelo bloco de subtração (702),  $S_{702}$ , será devido apenas a parcela efetivamente amplificada pelo efeito Brillouin. O bloco de ganho, (703), amplifica ou atenua o sinal detectado em (106),  $S_{106}$ , com um ganho  $G_{703}$  ajustável tal que:

$$G_{703} \propto \frac{P_{BASE2}}{P_{106}}$$

desta forma o sinal de diferença gerado pelo bloco de subtração (704),  $S_{704}$ , será devido apenas a parcela efetivamente atenuada pelo efeito Brillouin. O bloco de

subtração (705) realiza a subtração entre o sinal efetivamente amplificado,  $S_{702}$ , e o sinal efetivamente atenuado,  $S_{704}$ , de forma que  $S_{705}=S_{702}-S_{704}$ . O ganho  $G_{705}$  é aplicado para elevar o nível do sinal de diferença entre  $S_{702}$  e  $S_{704}$  facilitando o seu tratamento eletrônico. O filtro passa-baixa (706) é utilizado para reduzir o ruído no sinal de diferença  $S_{705}$ . O sinal  $S_{706}$  é então comparado pelo bloco de subtração (708) com um sinal de referência gerado por 707,  $S_{707}$ , gerando o sinal de erro  $S_{708}=S_{706}-S_{707}$ .

O sinal de erro,  $S_{708}$ , é então processado por um bloco controlador (709), por exemplo um controle analógico PID (Proporcional, Integral e Derivativo), o qual gera o sinal que controla a frequência de emissão do laser (101). O sinal  $S_{709}$  visa compensar, através do controle de  $f_{101}$ , as variações em  $S_{706}$  em torno do ponto de referência  $S_{707}$ , devido às perturbações em  $\Delta f$ .

A figura 8 apresenta uma generalização dos sistemas de estabilização até agora descritos, através de um circuito optoeletrônico de estabilização padrão. Nela o campo óptico de bombeio proveniente de um laser de bombeio com frequência óptica  $f_{BOMBEIO}$  é inserida no circuito óptico de estabilização juntamente com o campo óptico de prova oriundo de outro laser de prova com frequência óptica  $f_{PROVA}$ . Observa-se que  $f_{BOMBEIO} > f_{PROVA}$ . Pelo menos um dos dois lasers deve permitir o controle da sua frequência óptica. Ambos campos ópticos possuem potências ópticas constantes ao longo do tempo.

Pela interação Brillouin dos campos ópticos de prova e bombeio no rolo de fibra óptica (803), o campo óptico de prova será amplificado e o campo óptico de bombeio será atenuado. Os acopladores direcionais (801) e (802) permitem monitorar as potências ópticas de interesse para a estabilização. A potência óptica de inserção do campo de bombeio é monitorada pelo detector (805) e a potência óptica de inserção do campo de prova é monitorada pelo detector (806). A amplificação Brillouin do campo óptico de prova é monitorada pelo detector (804). A atenuação Brillouin do campo de bombeio é monitorada pelo detector (807). As potências ópticas



detectadas por (804), (805), (806) e (807) são utilizadas pelo sistema eletrônico de estabilização, (808), o qual é responsável por gerar um sinal destinado a controlar a frequência óptica de um dos dois lasers, bombeio ou prova.

O sistema de estabilização, (808), pode ser qualquer um dos apresentados nas figuras 4, 6 ou 7. O sinal  $S_{808}$  irá controlar a frequência de emissão de um dos dois lasers com o objetivo de manter constante a diferença de frequência óptica  $f_{BOMBEIO}-f_{PROVA}$  mantendo constante a amplificação e ou atenuação Brillouin dos campos ópticos de prova/bombeio interagindo no rolo de fibra óptica, tal como descrito anteriormente.

A figura 9 apresenta uma configuração óptica, que incorpora a técnica aqui apresentada, para estabilizar a diferença de frequência entre N fontes de laser. Nesta configuração, a diferença entre a frequência óptica entre dois lasers adjacentes é estabilizada, em um valor próximo à  $f_B$ , por um circuito óptico de estabilização tal como o apresentado na figura 8. A potência óptica das fontes de laser (9011) à (901N) é constante ao longo do tempo. As fontes de laser (9011) à (901N) permitem o controle de suas frequências ópticas de emissão. Os isoladores ópticos (9021) à (902N) são utilizados para prevenir a reverberação de campos ópticos nas cavidades dos lasers (9011) à (901N). A frequência óptica do laser (9011) é maior que a do laser (9012), que por sua vez é maior que a do laser (9013) e assim por diante, de forma que  $f_{9011} > f_{9012} > f_{9013} \dots > f_{901N}$ .

Parte da luz dos lasers (9011) e (9012) são desviadas respectivamente pelos acopladores ópticos direcionais (9031) e (9041) para um sistema optoeletrônico de estabilização, (9051), tal como o apresentado na figura 8. O laser (9011) é identificado como o laser de bombeio e o laser (9012) como o laser de prova. Este sistema de estabilização prove um sinal de controle para o laser (9011) que tem por finalidade estabilizar a diferença de frequência óptica  $f_{9011}-f_{9012}$  tal como explicado anteriormente.

Parte da luz dos lasers (9012) e (9013) são desviadas respectivamente pelos acopladores ópticos direcionais (9032) e (9042) para um sistema optoeletrônico de estabilização, (9052), tal como o apresentado

na figura 8. Como  $f_{9012} > f_{9013}$ , o laser (9012) é identificado como o laser de bombeio e o laser (9013) como o laser de prova. Este sistema de estabilização prove um sinal de controle para o laser (9013) que tem por finalidade estabilizar a diferença de frequência óptica  $f_{9012} - f_{9013}$  tal como explicado anteriormente.

5 O funcionamento desta configuração segue de modo análogo ao descrito até o momento, para a estabilização das diferenças de frequência óptica  $f_{8013} - f_{8014}$  à  $f_{801(N-1)} - f_{801N}$  em um valor próximo à  $f_B$ . A figura 10 apresenta o espectro relativo à separação entre as frequências de emissão dos laser (9011) à (901N) utilizando a configuração apresentada na figura 9.

10 Atualmente sistemas de comunicação que exploram a multiplexação densa por comprimento de onda operam na região de  $1,5\mu\text{m}$  com uma separação mínima de 50GHz entre os diversos canais ópticos. Nossa técnica permite que, na região de  $1,5\mu\text{m}$ , a distância espectral entre canais seja reduzida para 11GHz (valor de  $f_B$  nesta região), ou seja aumentando o  
15 número de canais ópticos no sistema de comunicação, em relação à tecnologia atualmente disponível.

A técnica aqui apresentada garante que a distância espectral entre canais será estabilizada com uma incerteza não maior que metade da largura da amplificação/depleção Brillouin, isto é  
20 aproximadamente 30MHz (região utilizada para estabilização). Assim, a técnica garante uma incerteza de estabilização de 30MHz em 11GHz ( $\sim 0,3\%$ ) permitindo descartar a ocorrência da interferência entre canais, a qual é consequência da falta de um controle eficaz da distância espectral entre canais.

Os diagramas em bloco apresentados nas figuras  
25 4, 6 e 7, podem ser implementados através de circuitos eletrônicos analógicos ou, através de circuitos eletrônicos digitais que se utilizam dos valores digitalizados, por conversores analógico/digital, das potências ópticas detectadas por (105), (106), (107) e (108) para realizar, através de processadores digitais, as operações constantes nos referidos diagramas de bloco. Nos sistemas digitais, o  
30 sinal de controle seria gerado por um conversor digital/analógico, permitindo a compatibilidade entre a entrada de sintonia da frequência do laser a ser

controlado e o sinal digital de controle.

A técnica apresentada foi testada em laboratório para campos ópticos na região de  $1,32\mu\text{m}$  e se mostrou eficiente no controle da diferença de frequência óptica entre um laser de cavidade Nd:Yag e um diodo laser DFB. A técnica garantiu uma incerteza de estabilização menor que 1MHz para uma distância espectral de 13GHz ( $\sim 0,008\%$ ) e permitiu a implementação de um sensor distribuído de temperatura utilizando o efeito Brillouin em fibra óptica.

Comparando nossa técnica com sistemas similares utilizando analisadores de espectro óptico, é evidente a elevada performance de estabilização conseguida. Como exemplo, levando em consideração que a resolução de analisadores de espectro óptico é da ordem de 1GHz, teremos para uma separação entre canais de 13GHz uma incerteza de estabilização de 7,7% mais de mil vezes pior que a resolução experimental obtida na implementação da técnica.

Técnicas heteródinas, utilizando a detecção da frequência de batimento óptico entre os campos ópticos de interesse permitem reduzida incerteza de estabilização, ou seja, alta performance. No entanto, o elevado custo de implementação destas técnicas inviabiliza o seu uso em sistemas comerciais.

Técnicas que utilizam interferometria óptica, como dito anteriormente necessitam de demasiados cuidados práticos para que se obtenha máxima performance de estabilização. Nossa técnica emprega conceitos simples e de fácil implementação prática. Assim, deve-se somar ao mérito da técnica tanto o seu reduzido custo de implementação quando comparado com o alto valor dos equipamentos utilizado por outras técnicas destinadas ao mesmo objetivo, como analisadores de espectro óptico, interferômetros ópticos e analisadores de espectro de microondas. Tanto quanto a sua facilidade de implementação prática quando em comparação com outras técnicas destinadas a estabilização da diferença de frequência óptica entre a radiação gerada por fontes laser.

## REIVINDICAÇÕES

1 - "TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO DA DIFERENÇA DE FREQUÊNCIA ÓPTICA ENTRE A RADIAÇÃO DE DUAS OU MAIS FONTES LASER UTILIZANDO O ESPALHAMENTO BRILLOUIN ESTIMULADO", caracterizada por  
5 utilizar uma configuração óptica constituída por: Laser de Bombeio (101), Laser de Prova (102), acopladores ópticos (103) e (104), fibra óptica (109), isoladores ópticos (110) e (111) e detectores ópticos (105), (106), (107) e (108).

2 - "TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO DA DIFERENÇA DE FREQUÊNCIA ÓPTICA ENTRE A RADIAÇÃO DE DUAS OU MAIS FONTES LASER UTILIZANDO O ESPALHAMENTO BRILLOUIN ESTIMULADO", caracterizada por  
10 utilizar o fenômeno conhecido como amplificação Brillouin para inferir as variações na diferença de frequência das fontes de laser (101) e (102) por meio das variações na potência óptica amplificada do laser de Prova (102), pelo efeito Brillouin, detectada por (105) e, por meio desta, gerar um sinal de controle para  
15 o laser (101) com o intuito de estabilizar a supracitada diferença de frequência óptica.

3 - "TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO DA DIFERENÇA DE FREQUÊNCIA ÓPTICA ENTRE A RADIAÇÃO DE DUAS OU MAIS FONTES LASER UTILIZANDO O ESPALHAMENTO BRILLOUIN ESTIMULADO", caracterizada por  
20 utilizar o fenômeno conhecido como atenuação Brillouin para inferir as variações na diferença de frequência das fontes de laser (101) e (102) por meio das variações na potência óptica atenuada do laser de Bombeio (102), pelo efeito Brillouin, detectada por (108) e, por meio desta, gerar um sinal de controle para  
o laser (101) com o intuito de estabilizar a supracitada diferença de frequência  
25 óptica.

4 - "TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO DA DIFERENÇA DE FREQUÊNCIA ÓPTICA ENTRE A RADIAÇÃO DE DUAS OU MAIS FONTES LASER UTILIZANDO O ESPALHAMENTO BRILLOUIN ESTIMULADO", caracterizada por  
inferir as variações na diferença entre a frequência óptica das fontes de laser  
30 (101) e (102) utilizando as variações na diferença entre a potência óptica

detectadas por (105) e (108) e, por meio destas, gerar um sinal de controle para o laser (101) com o intuito de estabilizar a supracitada diferença de frequência óptica.

**5 – “TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO DA DIFERENÇA DE FREQUÊNCIA ÓPTICA ENTRE A RADIAÇÃO DE DUAS OU MAIS FONTES LASER UTILIZANDO O ESPALHAMENTO BRILLOUIN ESTIMULADO”**, caracterizada por utilizar um esquema de estabilização constituído por: bloco de ganho (401), bloco de diferença e ganho (402), filtro passa-baixa (403), gerador de valor de referência (405), bloco de diferença (404) e sistema de controle (406); este esquema é responsável por gerar um sinal capaz de controlar a frequência de emissão da fonte de laser (101) visando estabilizar a diferença entre as frequências ópticas das fontes de laser (101) e (102) através da estabilização da potência óptica amplificada pelo efeito Brillouin e detectada por (105).

**6 – “TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO DA DIFERENÇA DE FREQUÊNCIA ÓPTICA ENTRE A RADIAÇÃO DE DUAS OU MAIS FONTES LASER UTILIZANDO O ESPALHAMENTO BRILLOUIN ESTIMULADO”**, caracterizada por utilizar um esquema de estabilização constituído por: bloco de ganho (601), bloco de diferença e ganho (602), filtro passa-baixa (603), gerador de valor de referência (605), bloco de diferença (604) e sistema de controle (606); este esquema é responsável por gerar um sinal capaz de controlar a frequência de emissão da fonte de laser (101) visando estabilizar a diferença entre as frequências ópticas das fontes de laser (101) e (102) através da estabilização da potência óptica atenuada pelo efeito Brillouin e detectada por (105).

**7 – “TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO DA DIFERENÇA DE FREQUÊNCIA ÓPTICA ENTRE A RADIAÇÃO DE DUAS OU MAIS FONTES LASER UTILIZANDO O ESPALHAMENTO BRILLOUIN ESTIMULADO”**, caracterizada por utilizar um esquema de estabilização constituído por: blocos de ganho (701) e (703), blocos de diferença (702) e (704), bloco de diferença e ganho (705), filtro passa-baixa (706), gerador de valor de referência (705), bloco de diferença (708) e sistema de controle (709); este esquema é responsável por gerar um sinal

estabilizar a diferença entre as frequências ópticas das fontes de laser (101) e (102) através da estabilização da diferença entre as potências ópticas amplificada e atenuada pelo efeito Brillouin, respectivamente detectadas por (105) e (108).

5                                    **8 – “TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO DA DIFERENÇA DE FREQUÊNCIA ÓPTICA ENTRE A RADIAÇÃO DE DUAS OU MAIS FONTES LASER UTILIZANDO O ESPALHAMENTO BRILLOUIN ESTIMULADO”**, caracterizada por utilizar um esquema optoeletrônico de estabilização da diferença entre a frequência óptica de um campo de bombeio e um campo de prova utilizando o

10 efeito Brillouin, constituído por: um fibra óptica para inserção do campo óptico de bombeio (809), uma fibra óptica para inserção do campo óptico de prova (810), dois acopladores ópticos (801) e (802), um detector óptico para a potência óptica de inserção do campo óptico de bombeio (805), um detector óptico para a potência óptica de inserção do campo óptico de prova (806), um detector óptico

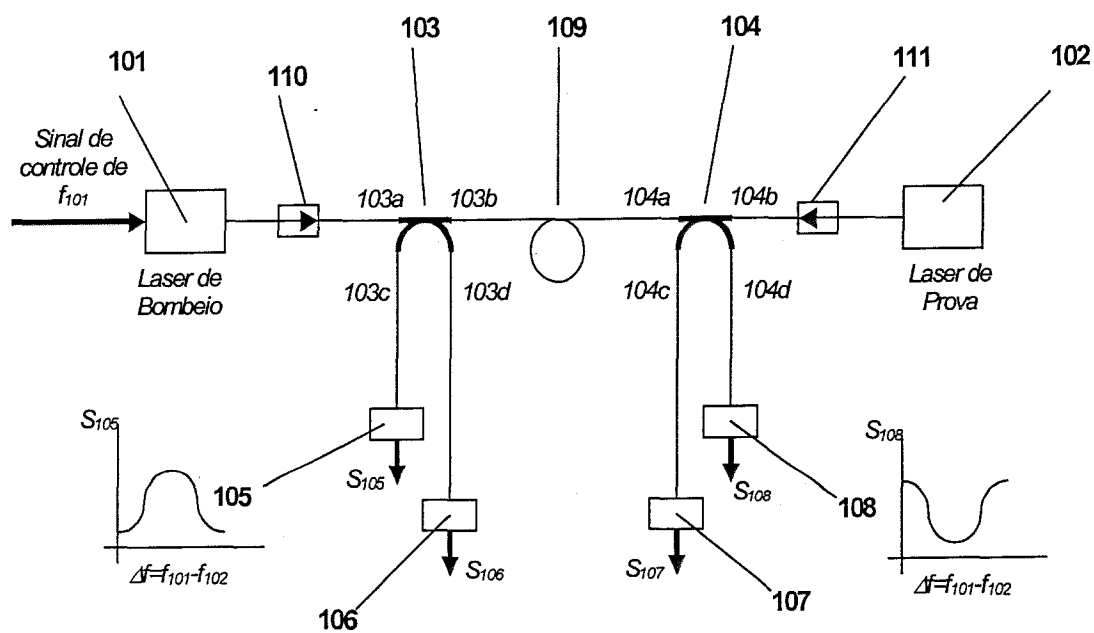
15 para a potência óptica do campo óptico de prova amplificada pelo efeito Brillouin (804), um detector óptico para a potência óptica do campo óptico atenuado pelo efeito Brillouin (807) e um sistema de estabilização (808), o qual pode ser um dos constantes nas reivindicações 5, 6, ou 7, que utiliza as potências ópticas detectadas para gerar um sinal de controle para a frequência de emissão

20 de uma das fontes de laser que emitem o campo óptico de bombeio ou prova com o intuito de estabilizar a diferença de frequência óptica  $f_{\text{BOMBEIO}} - f_{\text{PROVA}}$ .

**9 – “TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO DA DIFERENÇA DE FREQUÊNCIA ÓPTICA ENTRE A RADIAÇÃO DE DUAS OU MAIS FONTES LASER UTILIZANDO O ESPALHAMENTO BRILLOUIN ESTIMULADO”**, caracterizada por

25 utilizar uma configuração óptica capaz de estabilizar a diferença de frequência óptica entre N fontes de radiação laser por meio do efeito Brillouin, constituída por: fontes de radiação laser (9011) à (901N), isoladores ópticos (9021) à (902N), acopladores ópticos (9031) à (903(N-1)), acopladores ópticos (9041) à (904(N-1)), sistema optoeletrônico de estabilização utilizando o efeito Brillouin

30 (9051) à (905(N-1)) e descrito na reivindicação 8.



**FIGURA 01**

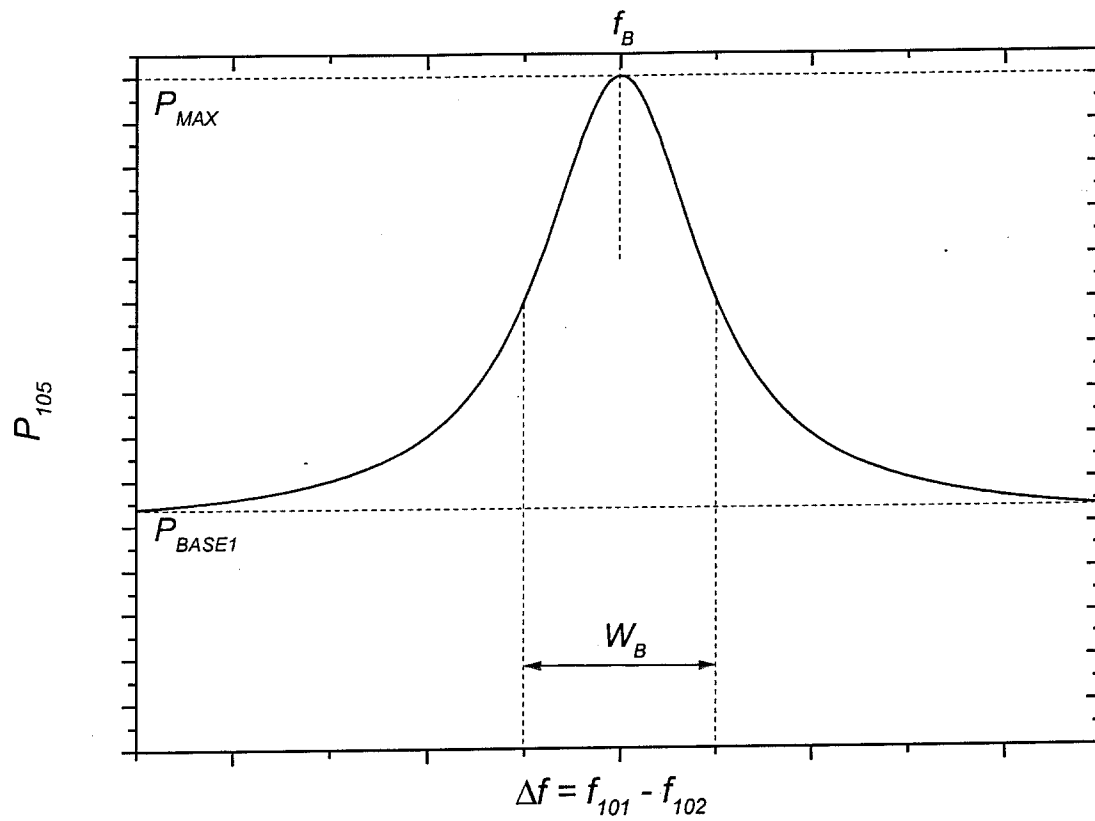


FIGURA 02



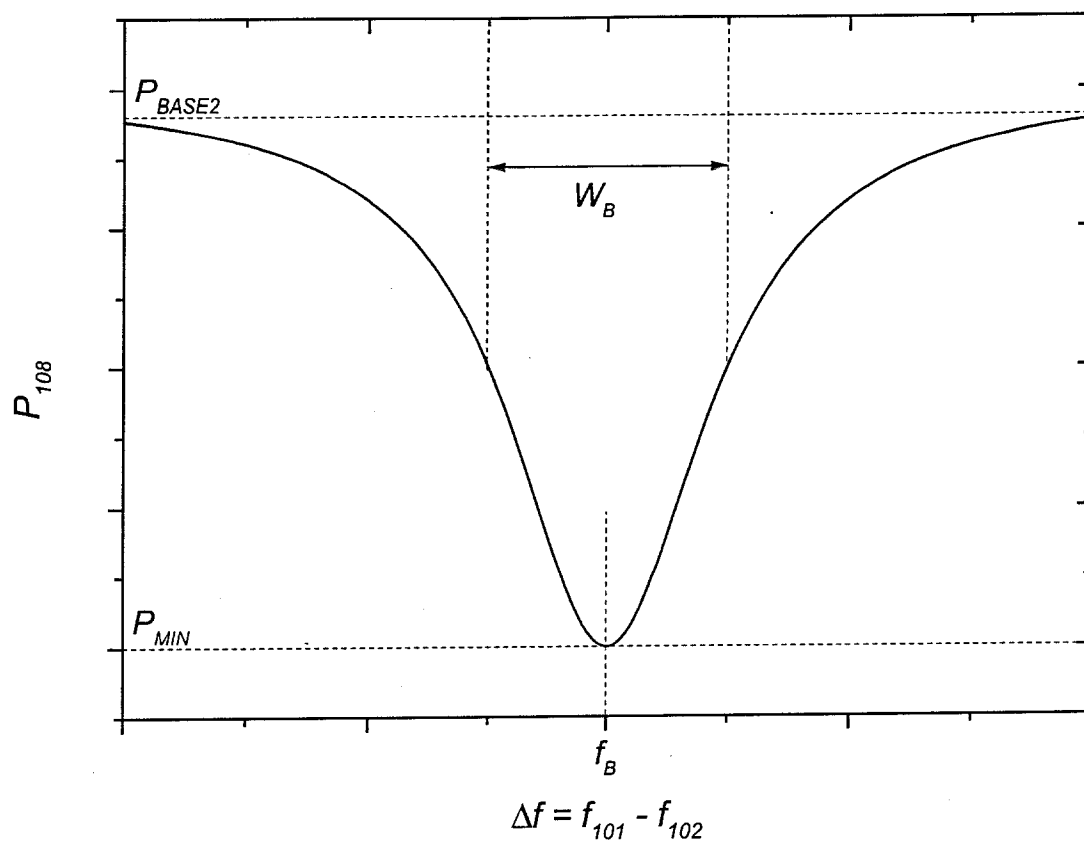


FIGURA 03

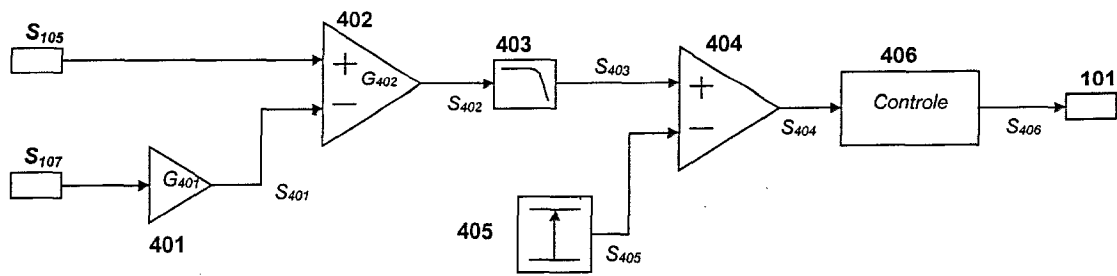


FIGURA 04

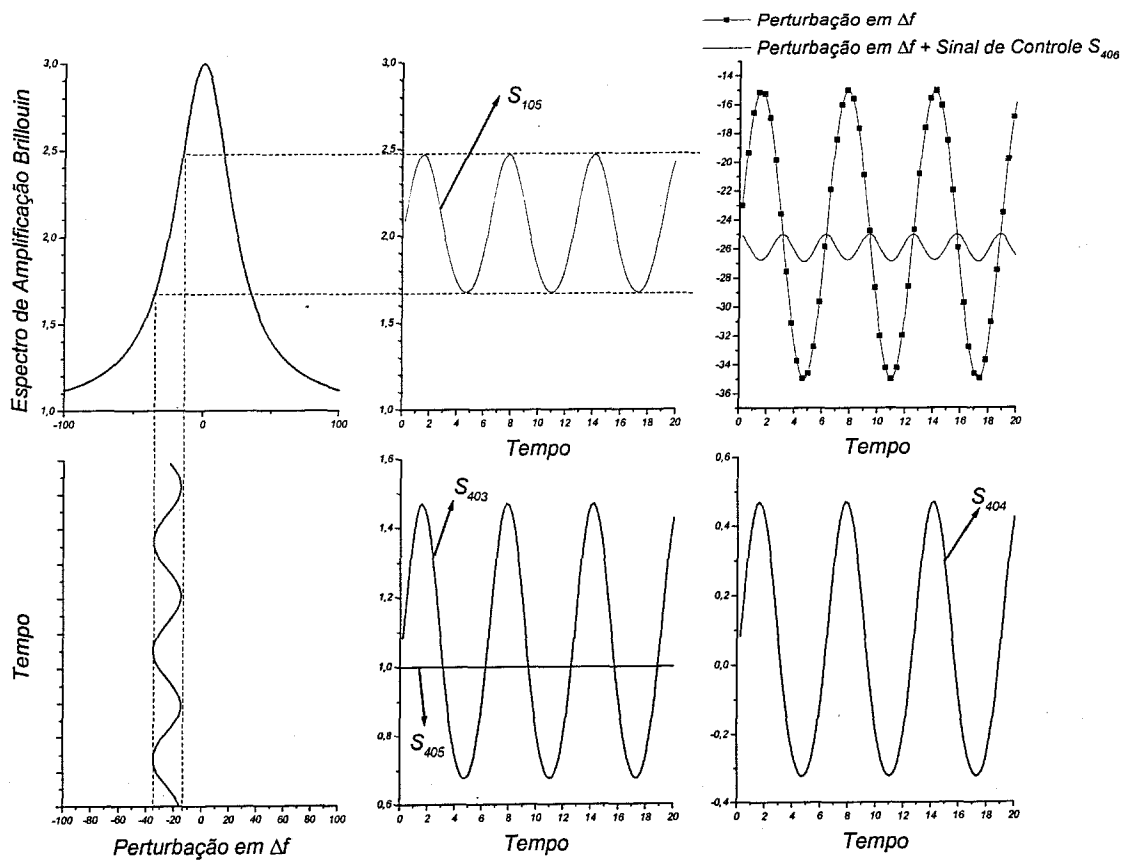


FIGURA 05

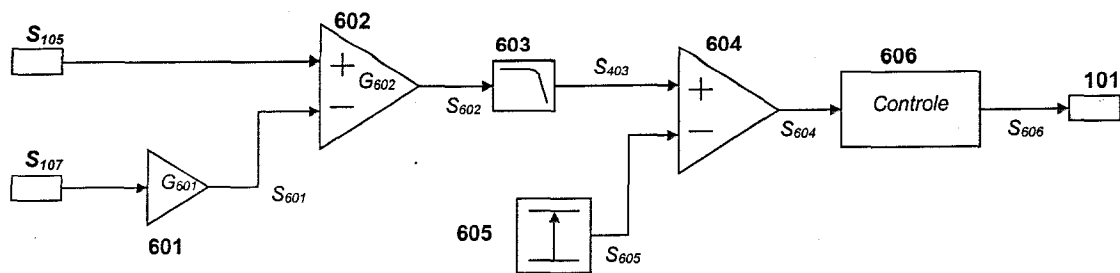


FIGURA 06

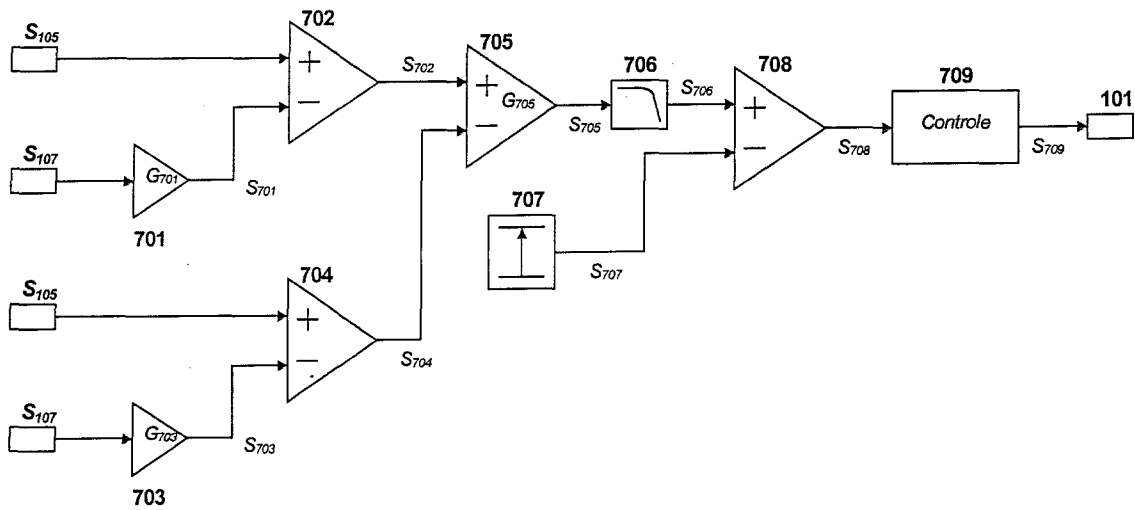


FIGURA 07

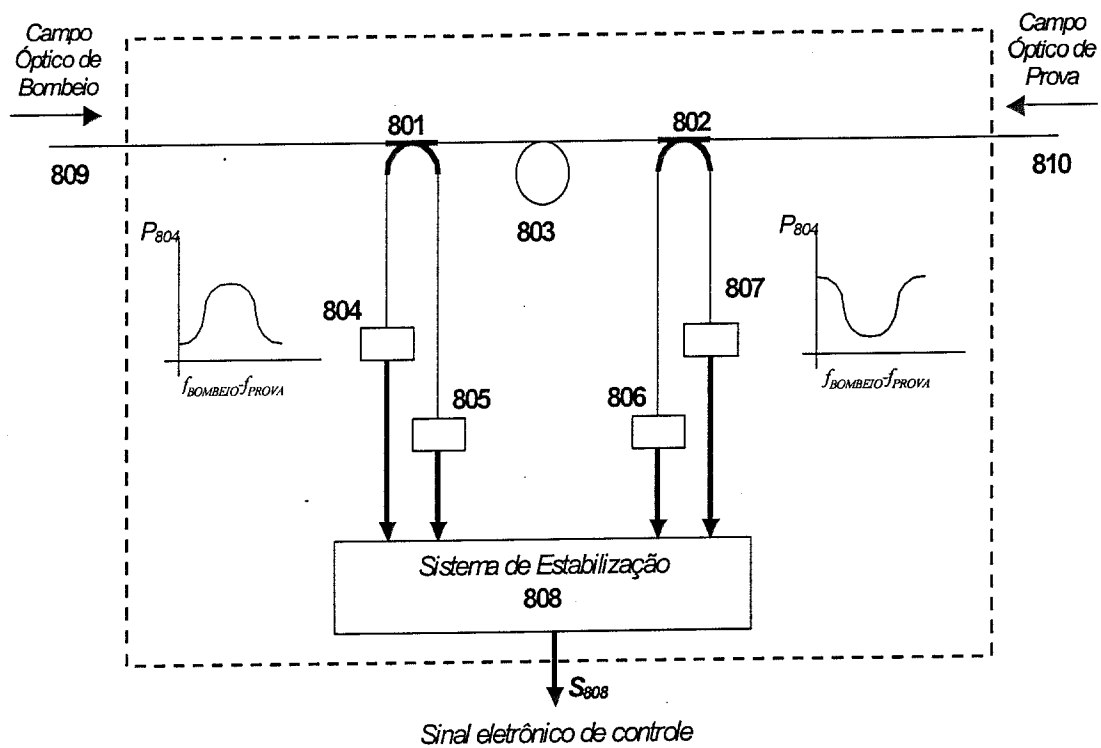


FIGURA 08

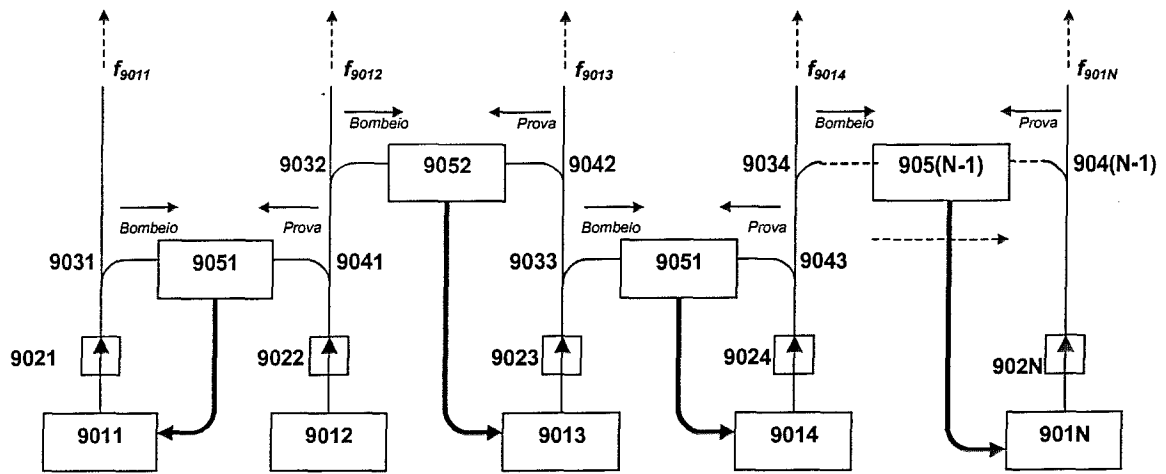


FIGURA 09

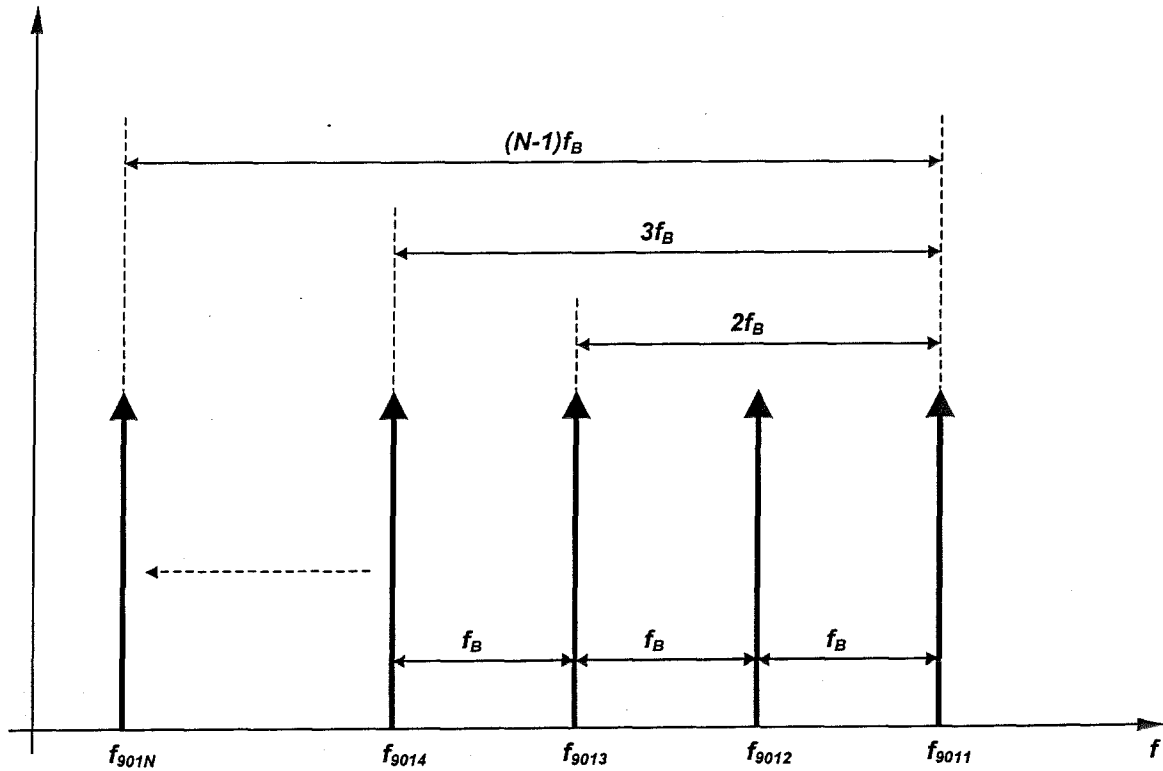


FIGURA 10

## RESUMO

“TÉCNICA DE ESTABILIZAÇÃO DA DIFERENÇA DE FREQUÊNCIA ÓPTICA ENTRE A RADIAÇÃO DE DUAS OU MAIS FONTES LASER UTILIZANDO O ESPALHAMENTO BRILLOUIN ESTIMULADO”.

Refere-se o presente relatório a uma nova técnica para a estabilização da diferença de frequência óptica entre a radiação de duas ou mais fontes de radiação laser, utilizando para este fim o efeito óptico não-linear conhecido como espalhamento Brillouin estimulado ocorrendo em uma fibra óptica.

Propõe-se a utilização dos fenômenos conhecidos por amplificação Brillouin e atenuação Brillouin para inferir variações na diferença entre as frequências ópticas de duas fontes de radiação laser. Nestes fenômenos, as potências ópticas, amplificada e atenuada pelo efeito Brillouin, dependem da diferença entre as frequências dos dois campos ópticos interagentes. Assim, monitorando-se as variações na potência óptica amplificada ou atenuada é possível gerar um sinal capaz de controlar a frequência de emissão de uma das duas fontes de radiação laser, visando a estabilização da diferença de frequência óptica entre os dois campos ópticos que participam da interação.

Três propostas de estabilização são apresentadas, a primeira utilizando apenas o fenômeno de amplificação Brillouin, a segunda utilizando apenas o fenômeno de atenuação Brillouin e, por fim, uma terceira utilizando conjuntamente os fenômenos de amplificação e atenuação decorrentes do efeito Brillouin. Um sistema opto-eletrônico de estabilização utilizando o efeito Brillouin também é proposto como forma de viabilizar um esquema capaz de estabilizar a diferença de frequência emitida entre mais de duas fontes de radiação laser.

A técnica proposta foi testada e validada em laboratório e se mostrou eficaz na estabilização da diferença de frequência óptica entre duas fontes de radiação laser com elevado nível ruído em suas frequências de emissão.